

熔融石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究

单耀莹^{1,2} 赵江山¹ 李慧¹ 王倩¹ 沙鹏飞¹ 周翊¹ 周军³
袁志军³ 张海波³ 楼祺洪³

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094; ² 中国科学院大学, 北京 100049)
³ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 针对准分子激光器的相关应用,对准分子激光进行光谱控制是非常必要的。相关光谱控制主要包括激光线宽窄化及激光中心波长的稳定输出,常用的线宽压窄方式是利用扩束棱镜组结合光栅构成线宽压窄模块达到激光线宽窄化的效果。利用熔融石英(FS)等腰直角棱镜与光栅的组合实现了线宽 0.957 pm 的 ArF 准分子激光输出。理论分析和实验结果表明,作为深紫外波段的良好透光材料,熔融石英棱镜可以实现与常用氟化钙(CaF₂)棱镜相近的线宽压窄结果。同时作为等腰直角方式设计,具有更高的切割成型工艺精度、更低的使用维护成本和更广泛的应用价值。

关键词 激光器;准分子激光器;线宽压窄;棱镜;熔融石英;CaF₂

中图分类号 TN242; TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0402008

Application Study on Fused Silica Prisms in Excimer Laser Spectrum Control

Shan Yaoying^{1,2} Zhao Jiangshan¹ Li Hui¹ Wang Qian¹ Sha Pengfei¹
Zhou Yi¹ Zhou Jun³ Yuan Zhijun³ Zhang Haibo³ Lou Qihong³

¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Due to the application of excimer lasers, it is necessary to control the output spectrum of excimer laser. Control spectrum contain narrowing bandwidth and stable output of center wavelength. The familiar mean of line-narrowing is using combination of beam expander prisms and grating to narrow the bandwidth of laser. With the combination of fused silica prisms and grating controlling the ArF excimer laser, the line-narrowed excimer laser of the output spectrum of light source is 0.957 pm. Theory analysis and experiments indicate that with a high transmission in ultraviolet (UV), fused silica prisms can reach the same effect in line-narrowing with the CaF₂ which is often used now. At the same time, the cutting way of isocles triangle prisms can be made more exactly, less costing and should be applied more widely.

Key words lasers; excimer laser; line narrow; prism; fused silica; CaF₂

OCIS codes 140.2180; 140.3300; 140.3380; 230.5480

收稿日期: 2012-11-19; **收到修改稿日期**: 2012-12-19

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02306-02)资助课题。

作者简介: 单耀莹(1987—),女,硕士研究生,主要从事准分子激光器及激光光谱控制方面的研究。

E-mail: shanyaoying@126.com

导师简介: 赵江山(1974—),男,博士,副研究员,主要从事准分子激光器、固体激光技术、超短脉冲激光技术、相关激光器件研究、非线性光学技术以及相关超快现象过程和技术等方面的研究。E-mail: zhaojiangshan@aoe.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

准分子激光器具有脉冲功率密度高、能量大和波长短等优点,被广泛应用于微精细加工^[1]、激光切割、微电子^[2]和医学等领域。作为标准光刻光源,准分子激光在半导体芯片制造产业中被广泛应用。以 193 nm 深紫外激光辐射为特征的 ArF 准分子激光光源是当前国际光刻曝光光源的主要选择^[3]。通常 ArF 准分子激光器输出的自然线宽在 500 ~ 700 pm^[4],按照目前实际曝光工艺要求,曝光光源激光线宽需要控制在 0.3 pm 以下,所以针对 ArF 准分子激光器输出激光光谱的有效控制就显得尤为必要,相关光谱控制主要包括激光线宽窄化及激光中心波长的稳定输出。

目前有关光刻用 ArF 准分子激光线宽压窄的研究报道主要集中在相对 193 nm 波长透射率较高的 CaF₂ 材料扩束棱镜组(根据特征角度设计直角棱镜)结合光栅实现线宽压窄的工作^[5]。

位于深紫外波段 193 nm 的激光辐射,在常规光学材料中都会导致强烈吸收,光学透射率较低。这个波段适用的光学晶体材料主要包括以 CaF₂、MgF₂ 为代表的相关氟化物以及紫外波段的熔融石英材料^[6]。目前国际上光刻用 193 nm 准分子激光线宽压窄技术常采用具有特征角度设计的 CaF₂ 材料直角棱镜模式。

但高质量 CaF₂ 晶体生长加工周期相对较长^[7],晶体通常沿(111)面解理,特别是在特殊角度加工的实际工作中,原料毛坯的切割过程很容易发生开裂破损,同样的问题也发生在粗磨和抛光工序中^[8],甚至很小的压力和温度变化都会引起破坏性效果,这将在一定程度上破坏晶体内部结构的均匀性,从而会引起晶体本身的光学性质(诸如传输波前、能量损伤特性和双折射特性等)改变,这些因素都会影响棱镜在线宽压窄模块中的使用。

同时由于国内高质量 CaF₂ 晶体生长及加工能力有限,必须依赖国外进口,相应定制周期长、价格昂贵、研发成本提高等因素的存在不利于相关实验研究的及时开展。

与 CaF₂ 晶体相比,紫外级熔融石英目前在准分子激光技术相关的光学元件制造中具有更广阔的制备和应用前景。熔融石英是由高温下 SiO₂ 与碱性氧化物或某些金属的碳酸盐共熔,生成硅酸盐,再经降温、冷却所形成,具有良好的紫外透过性能^[9],同时制造相对简单,价格低廉,购置渠道方便。基于实验研发的要求,由于激光线宽压窄的本质取决于

光束的扩束倍率和整体线宽压窄模块的光能利用效率,为提高加工精度、节约成本,实验以紫外级的熔融石英材料为基础,通过无特殊角度设计的等腰直角棱镜设计针对准分子激光线宽压窄特性进行了理论和实验研究,并对相关线宽压窄的实验结果开展了系统的分析。

2 实验条件及装置

常规光学材料的折射率会随着材料本身温度的变化而发生变化。激光入射到线宽压窄模块中,棱镜吸收光能,温度升高,折射率会发生改变,光束通过棱镜时会偏离理论设计的传播路径,对线宽压窄的效果产生一定的影响。本实验用棱镜组采用顶角(光入射斜边与入射直角边夹角)上-上-...-上-下结构的多棱镜组合方式,如图 1 所示,即前面 n 个棱镜顶角向上放置,最后一个棱镜顶角向下放置的组合方式。这样的组合方式可以在一定程度上实现棱镜扩束组色散消减作用,避免由于温度变化所引发的材料色散变化情况的出现。

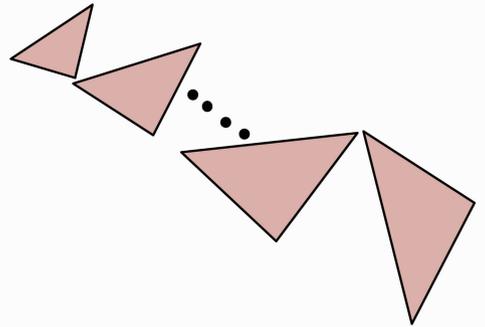


图 1 棱镜组顶角上-上-...-上-下结构示意图

Fig. 1 Sketch of prisms up-up-...-up-down configuration

线宽压窄模块中,常通过光束扩束倍率与光能利用效率综合考虑确定扩束棱镜的数量,棱镜过多会增加激光腔的反射损耗和腔长增长所产生的损耗,扩束棱镜数量一般不超过 5 个^[10]。实验中使用未镀膜的熔融石英棱镜,不考虑入射角度的限制。为获得期望的扩束倍数,根据相应计算,利用三个熔融石英等腰直角棱镜构成扩束棱镜组,结合光栅,组成线宽压窄模块,针对 193 nm 脉冲准分子激光进行线宽压窄实验研究。

实验装置如图 2 所示。线宽压窄模块中扩束棱镜组采用熔融石英等腰直角棱镜设计,棱镜组激光光束扩束后沿光栅闪耀角方向入射,借助于光栅与输出耦合镜所形成的激光谐振腔往返传输振荡。转动光栅,可以通过光谱空间位置的展开变化与激光

谐振腔的振荡耦合进行精细激光光谱调谐,实现激光线宽的中心波长调谐和综合光谱控制。

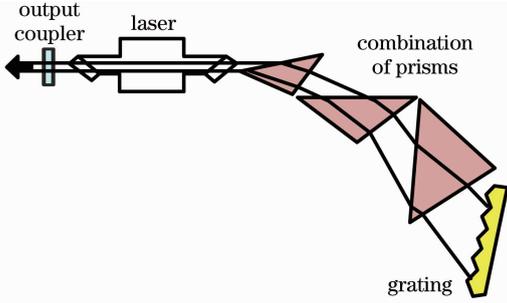


图 2 准分子激光线宽压窄实验装置图
Fig. 2 Experiment configuration of excimer laser line-narrowing

3 理论分析及实验结果

采用不同的入射方式对棱镜的扩束作用及线宽压窄结果进行了实验研究。利用三个棱镜与光栅的组合可以实现线宽 0.957 pm 的激光输出,实验结果如图 3 所示。图中显示了利用三个熔融石英等腰直角棱镜与光栅结合作为线宽压窄模块实现的光谱输出结果,光谱仪信噪比(SNR)为 832 dB 时,光谱线的半峰全宽(FWHM)为 0.957 pm。



图 3 实验激光光谱图

Fig. 3 Output spectrum of excimer laser in experiment

在用于光刻的 ArF 准分子激光器中,通过棱镜组与光栅构成的线宽压窄系统可以有效地实现线宽压窄,常规激光线宽的一般表达为

$$\Delta\lambda = \Delta\theta \left[\sqrt{NM} \left(\frac{\partial\theta_G}{\partial\lambda} \right)_G + \sqrt{N} \left(\frac{\partial\theta_P}{\partial\lambda} \right)_P \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为输出的激光线宽, $\Delta\theta$ 为激光光束发散角, N 为激光脉冲宽度时限在腔内往返次数,与激光脉宽及激光谐振腔腔长有关, M 为光束扩束倍数^[11],

$\left(\frac{\partial\theta_G}{\partial\lambda} \right)_G$ 为光栅色散, $\left(\frac{\partial\theta_P}{\partial\lambda} \right)_P$ 为扩束棱镜系统色散。

由(1)式可以看出,输出激光的线宽主要取决于放电腔本身特性及线宽压窄模块结构两个因素。其

中,放电腔本身特性包括激光光束发散角、脉宽以及腔长。线宽压窄模块对输出激光线宽的影响包括棱镜对光束的放大倍率、光栅系统色散以及棱镜系统色散几个方面。激光线宽与激光光束发散角的大小成正比,为了获得窄线宽,必须压缩光束发散角;另外激光线宽与光束放大倍率、棱镜以及光栅系统的色散大小成反比,所以选择更高的放大倍率和色散(材料、镀膜和工艺情况)是获得窄线宽的关键。

通过以上分析,针对消色散扩束棱镜组设计,棱镜对光束的扩束倍数 M 一定,线宽压窄的结果即确定,所以只要能够实现扩束倍数的理想值,线宽压窄的效果理论上应该是一致的。

利用传统的线宽压窄公式对三棱镜与光栅组合的线宽压窄系统进行分析,棱镜的扩束作用如图 4 所示。 M_1, M_2, M_3 分别为激光相应位置处的光束直径。

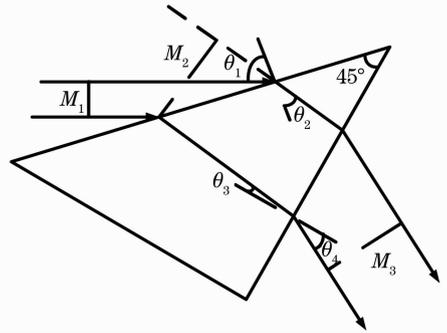


图 4 等腰直角棱镜的扩束作用

Fig. 4 Beam is expanded by an isosceles triangle prism

单个棱镜的扩束倍数为

$$M_i = \frac{M_3}{M_1} = \frac{M_2}{M_1} \times \frac{M_3}{M_2} = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \times \frac{\cos\theta_4}{\cos\theta_3}. \quad (2)$$

三个棱镜构成的扩束系统,扩束倍数为

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3, \quad (3)$$

当光束在每个棱镜上入射角以 $68^\circ \sim 73^\circ$ 范围变化时,每变化 1° ,利用(2)和(3)式可计算得出扩束倍数 M 在 9.42~19.05 之间。

光栅色散为 $\left(\frac{\partial\theta_G}{\partial\lambda} \right)_G = 2 \tan \beta / \lambda$, 其中 β 为光栅闪耀角, λ 为激光辐射波长。将以上各项参数代入(1)式可以得到压窄后线宽的理论值为 1.4~0.95 pm。

实验中测得输出线宽在不同棱镜扩束倍数下,输出线宽为 1.1~0.9 pm,输出线宽随棱镜对光束扩束倍数变化的曲线如图 5 所示,图中圆形标志的曲线是利用传统的线宽压窄公式计算得到的结果,正方形标志的曲线是根据实际测得的线宽输出并进行拟合得到的曲线。结果显示,利用三棱镜与光栅

组合的线宽压窄系统进行光谱控制,输出的激光线宽比根据常规的线宽压窄公式理论计算的结果更窄。图中两条曲线线型近似同比变化,对应棱镜相同扩束倍率,理论计算线宽值与实验测试线宽值的比值近似为常数,修正后的公式适用于本实验系统的准分子激光系统三棱镜与光栅组合的线宽压窄模块。

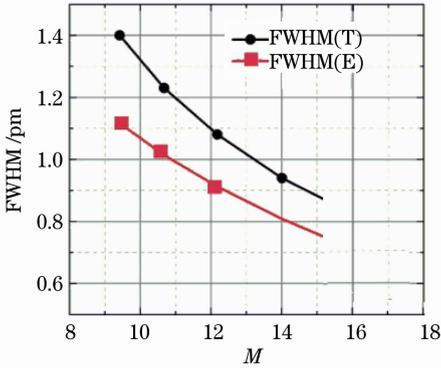


图 5 输出线宽随棱镜扩束倍数变化关系

Fig. 5 Relationship between output linewidth and beam expanded multiple

由于应用于光刻的准分子激光器,是相对复杂的高压气体放电系统,诸多参数决定输出光束的特性,如激光器的脉宽、腔长、输出能量、能量稳定性和发散角等。在针对深紫外准分子激光器的应用中,常规激光线宽定义表达需要根据激光系统的综合特性加以相应的修正,根据实验结果,修正后的线宽压窄公式为

$$\Delta\lambda = k\Delta\theta \left[\sqrt{NM} \left(\frac{\partial\theta_G}{\partial\lambda} \right)_G + \sqrt{N} \left(\frac{\partial\theta_P}{\partial\lambda} \right)_P \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中系数 $k \approx 0.75$, k 与激光器本身的综合运转特性有关,其他参数的定义与(1)式相同。

激光系统激光输出中心波长与线宽的抖动原因,主要源于线宽压窄装置自身的稳定性及调谐的

稳定性。线宽压窄模块中,光栅及棱镜组的精细调谐程度会对中心波长与线宽的抖动造成一定的影响;同时棱镜吸收激光的能量,温度升高会引起激光光束在其中传播的材料折射率及传输波前发生改变,于是光线的传播相对原本理想的路线会有一些偏折,结果造成光栅入射角度的差异和设计波长色散的偏离。

棱镜材料的光学和物理特性衡量指标主要包括:吸收系数、折射率 n 随温度 T 变化 (dn/dT)、热导率和热膨胀系数等^[12]。

1) 棱镜材料对光束的吸收系数一般应该小于 $0.1\%/cm$,最好是低于 $0.05\%/cm$ 。另外,选择折射率随温度变化 (dn/dT) 较小的材料,可以保证材料的折射率相对稳定,对于保持光束波前是有益的,质量较好的棱镜折射率随温度变化要小于 $1.5 \times 10^{-5}/^\circ C$ 或者更小(绝对值)。

2) 高的热导率可以加速热量耗散,避免高重复大能量激光对棱镜的物理损伤,同时也避免由折射率发生变化而引起的光路的非正常偏折,较好材料的热导率为 $9.7 W/(m \cdot K)$,或者更高,可达 $20 W/(m \cdot K)$ 。

3) 热膨胀系数的选取希望更接近固定棱镜的刚性结构材料的热膨胀系数,随着光束在棱镜中传输,棱镜温度升高也会传递给周围的固定棱镜装置,如果热膨胀系数相差很多,那么在温度升高时二者以不同的倍率膨胀,非正常的应力就会加在棱镜或加持装置上。棱镜会产生微小的形变或者位置上的移动,对光束的传输方向及扩束倍数都会产生影响。一般金属的夹持装置典型的热膨胀系数大约为 $9 \times 10^{-6} K^{-1}$ 。钢的大约为 $24 \times 10^{-6} K^{-1}$ 。

4) 选取棱镜材料时,需要进一步关注不同材料的 dn/dT 与材料热膨胀系数之间的关系。熔融石英与 CaF_2 的各种性质对比如表 1 所示^[13]。

表 1 熔融石英与 CaF_2 的光学特性参数

Table 1 Optical parameters of fused silica and CaF_2

Parameters	Fused silica	CaF_2
Thermal conductivity $/[W/(m \cdot K)]$	1.38	9.71
Coefficient of thermal expansion $/K^{-1}$	0.52×10^{-6}	18.85×10^{-6}
dn/dT at 193.00 nm $/(10^{-6} K^{-1})$	20.6	-3.6
Transmission $/\%$	>92	>99.5
n (193.00 nm)	1.560841	1.501808

对比表中两种材料的各项参数,针对不同材料棱镜的选择,得到:

熔融石英的热导率为 $1.38 W/(m \cdot K)$, CaF_2 的热导率为 $9.71 W/(m \cdot K)$ 。光束入射到线宽压窄模

块中第一块棱镜时光能量密度较高,选择热导率较高的 CaF_2 材料棱镜,有利于热量的散发,降低光束对棱镜的热致损伤。而 CaF_2 的热膨胀系数较熔融石英高,材料的热变形会引起折射率的变化,使得光

束偏离设计的方向；熔融石英材料 $dn/dT=20.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ， CaF_2 材料 $dn/dT=-3.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，采取两种材料棱镜配合使用的方式可以在一定程度上降低温度变化对折射率的影响。

4 结 论

实验中，利用三块熔融石英等腰直角棱镜与光栅的组合，实现了 $0.957 \mu\text{m}$ 线宽压窄输出，且输出能量符合使用需求。综合实验结果及材料光学特性的分析可知，功能使用方面，熔融石英材料棱镜不仅可以实现线宽压窄模块中扩束棱镜的作用，甚至可以取代目前准分子激光线宽压窄系统中常用的 CaF_2 材料棱镜，完成激光扩束功能；使用价值方面，熔融石英材料棱镜相对容易制备，等腰直角设计的棱镜切割方式对于晶体结构破坏程度降低，加工制备可靠性强，光学特性受影响程度低，同时价格相对较低，购置渠道相对便捷，对于光刻用准分子激光光源的产品化实现具有较大的应用价值和较好的未来发展前景。使用熔融石英材料的棱镜可以降低成本，便于实验研究及时开展。今后工作中需要进一步开展针对熔融石英棱镜镀膜特性以及熔融石英材料自身光学特性进行线宽压窄系统相关的理论优化设计和实验研发。

参 考 文 献

- 1 Liu Ying, Jiang Yijian. Patterned organic semiconductor poly (vinylidene fluoride) surfaces using KrF excimer laser treatment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0903001
刘莹, 蒋毅坚. 准分子激光技术实现聚偏氟乙烯表面导电图形化研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903001
- 2 Shen Xuefei, Chen Tao, Wu Jingxuan. Fabrication of

- microfluidic chip with two-step using excimer laser ablation micromachining technique and replica molding technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0903004
申雪飞, 陈涛, 吴靖轩. 准分子激光微加工技术结合模塑技术加工微流控芯片[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0903004
- 3 Uwe Stamm, Rainer Pätzel, Jürgen Kleinschmidt *et al.*. ArF excimer laser for 193 nm lithography [C]. *SPIE*, 1998, **3334**: 1010~1013
- 4 Dirk Basting, Gerd Marowsky. *Excimer Laser Technology* [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 182~190
- 5 Zhang Haibo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. ArF excimer laser line narrowing technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 46~51
张海波, 楼祺洪, 周军等. ArF 准分子激光器线宽压缩技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(12): 46~51
- 6 J. H. C. Sedlacek, M. Rothschild *et al.*. Optical materials for use with excimer lasers [C]. *SPIE*, 1992, **1835**: 80~88
- 7 Su Liangbi, Dong Yongjun, Yang Weiqiao *et al.*. Crystal growth and optical properties of calcium fluoride [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, **33**(1): 88~91
苏良碧, 董永军, 杨卫桥等. CaF_2 晶体的生长与光学性能 [J]. *人工晶体学报*, 2004, **33**(1): 88~91
- 8 Liu Hanwei, Jiang Guojing, Shen Yonghong. Material characteristic of fluorite and optical processing [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1997, **26**(3): 396
刘汉伟, 姜国经, 沈永宏. 萤石材料性能与光学加工 [J]. *人工晶体学报*, 1997, **26**(3): 396
- 9 熔融石英 [EB/OL]. <http://www.baik.baidu.com/view/920819>. [2013-02-04]
- 10 Zhang Haibo, Yuan Zhijun, Zhou Jun *et al.*. Optimal design of prism beam expander in line narrowed excimer laser cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102008
张海波, 袁志军, 周军等. 窄线宽准分子激光腔内棱镜扩束器的优化设计 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102008
- 11 F. J. Duarte. Multiple-prism arrays in laser optics [J]. *American J. Physics*, 2000, **68**(2): 162~166
- 12 Igor Vladimirovich Fomenkov, San Diego *et al.*. Excimer Laser with Greater Spectral Bandwidth and Beam Stability: American Patent No. 5,898,725 [P]. Apr. 27, 1999
- 13 Li Shixian, Zheng Nianle. *Handbook of Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 147~206
李世贤, 郑年乐. *光学设计手册* [M]. 北京: 北京理工大学出版, 1990. 147~206

栏目编辑：宋梅梅